

统计能量分析方法声振预测应用研究

刘海生, 杨春庄, 陈士杰

(同济大学声学研究所, 上海 200092)

摘要: 从声振系统激励和响应的频谱特征、预测模型的特点、精度等方面总结了统计能量分析方法(SEA)在多个领域内的应用成果, 得出了含有声子系统的双壳和单壳系统是两种基本的 SEA 声振预测模型的结论。该系统的特点是内外的声能交换须通过声振耦合来实现, 当激发的声波频率低于双壳的共振频率时, 双壳系统转化为单壳系统。深入讨论了影响其 SEA 模型预测精度的主要因素是结构子系统的划分方式、统计能量分析参数的测量, 以及有界空间内声振耦合损耗因子的正确计算。

关键词: 统计能量分析; 声振耦合; 共振传输; 非共振传输; 辐射比

中图分类号: TB532

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2010)-02-0192-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.02.016

Vibroacoustic applications of statistical energy analysis method

LIU Hai-sheng, YANG Chun-zhuang, CHEN Shi-jie

(Institute of Acoustic, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The achievements of applying Statistical Energy Analysis(SEA) Method in many fields have been summarized from the view points of the system excitation, feature of frequency response, prediction model and precision. It has been put forward that the double and single shell models containing acoustic subsystem are the basic types of sound and vibration coupling system. The feature of such systems is that the inside and outside sound field exchanges energy by sound-vibration coupling. The double system converts to a single system while the frequency of exciting sound lower than the resonant frequency of double shell. The main elements to influent the precision of such SEA models is division of subsystem, measurement of SEA parameters and coupling loss factor between sound field and vibration.

Key words: Statistical Energy Analysis; sound and vibration coupling system; resonant transmission; non-resonant transmission; radiation ratio

1 引言

自从上世纪 60 年代美国麻省理工学院的 R. H. Lyon、G. Maidanik 和英国的 P. W. Smith Jr. 等学者提出统计能量分析(Statistical Energy Analysis, SEA)理论以来, 经过 50 多年的发展, 该理论被广泛地应用到了航空航天、船舶潜艇、车辆、动力系统和建筑等各种领域的声振环境预测上, 取得了丰硕的成果。SEA 方法的核心思想是忽略被研究系统的细节, 对其随机参量进行时域、频域和空间统计, 用统计参量来描述系统, 并用能量这一独立、通用的参量将各种动力学系统联系在一起。SEA 方法特别适用于广谱激励的复杂声振耦合系统的响应预测, 目

前已经有成熟的商业软件面市, 如美国 Cambridge Collaborative 公司开发的 SEAM 和 Vibro-Acoustic Sciences 公司开发的 AutoSea 软件, 专门用于声振系统的动态预示。

本文将从系统激励和响应的频谱特征、SEA 预测模型的特点、预测精度等方面总结 SEA 理论在上述声振预测领域内的应用成果, 归纳出基本的 SEA 声振预测模型, 以及提高其预测精度所应深入研究的问题。

2 SEA 理论在各领域内的研究成果

2.1 航空航天领域

统计能量分析最初是从航空航天研究领域中发展起来的, 研究的对象基本上有: 火箭、飞机、卫星和导弹, 其特点是结构系数高^[1], 外层蒙皮十分轻薄, 即使在较低的激振频率范围内也可以激发

收稿日期: 2008-12-10; 修回日期: 2009-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(10774114)

作者简介: 刘海生(1968-), 男, 安徽人, 博士, 副教授, 研究方向为噪声与振动控制、建筑声学。

通讯作者: 刘海生, E-mail: 56614735@163.com

出许多模态。

飞机的机身基本上是由两层带肋蒙皮组成,通过肋板(支架)相连,内外蒙皮之间有空腔。机身的振动能量分别赋存在固体内的振动模态和封闭空间内的声场中,子系统间能量的传递有三种基本方式:结构之间的振动耦合、声场耦合以及声振耦合。因此按照能量赋存和传递的特征可以将机身复杂的 SEA 模型简化为外壳-空腔声子系统-内壳-内部声子系统的声振耦合系统,和内壳、外壳相连的设备、构件和仪表等可以分别合并到内壳和外壳子系统中。本文把这种类型的 SEA 系统简称为双壳型声振耦合系统,系统外部是充满流体的半无限空间,双壳之间的空腔厚度往往比另外两维的尺寸小得多,内部声子系统三个维度的大小相差一般不超过一个数量级,且至少比预测频率范围内声波半波长大一倍以上。另外一些飞行器如火箭等一般只有一层复合外壳,壳内空间为设备仪器提供运载空间。可以将其简化为外壳-内部声子系统的单壳型声振耦合系统。

双壳与单壳系统的共同之处在于系统内外的声场交换能量要通过声振耦合的方式。区别在于双壳系统声能交换要通过空腔。由于空腔厚度远比其他两维的尺寸小,因此其内部声场的模态分布特征随频率有很大的变化,对声能的赋存和声振耦合方式有很大的影响:对于高频可以将其作为声子系统看待,对于低频(低于内外壳体的共振频率),双壳和空腔内空气质点作同相振动,双壳系统转化为单壳系统。这样分类的目的是把声能的赋存和传递(声振耦合)作为研究的重点,声振耦合包括封闭声场和半自由声场与振动的耦合。

对于这些飞行器,振动和噪声的激励源主要是发动机等动力系统、空气脉动压力和气流冲击或机体姿态突然改变产生的脉冲激励,基本上都是广谱激励,例如火箭再入大气后脉动噪声的频谱范围为 20~10000Hz^[2]。图 1、图 2、图 3 分别是飞机^[3]、导弹^[4]和卫星太阳翼^[5]实验时部份子系统的响应谱实测结果。

根据研究对象特点和精度要求的不同,SEA 模型子系统划分的数目有较大的变化,复杂飞机的模型有几十个子系统,其研究重点是舱内的声舒适度,预测模型的输出变量多为声压级,文献[3]的研究表明在 800Hz 以上的频率范围内预测误差为 3dB 左右。火箭和导弹的简单模型仅有 3~5 个子系统^[6],卫星的复杂模型可达 26 个子系统^[2]。这类高速飞行物体的研究重点是气动噪声对舱内设备、仪器受力的影响,例如火箭再入大气受到脉动空气的激励,

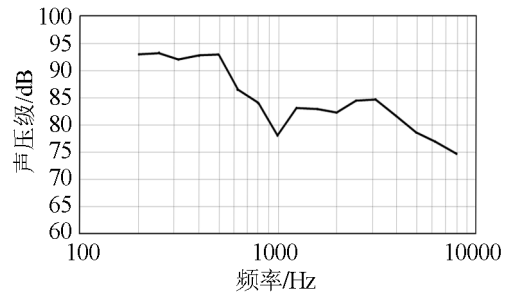


图 1 实验条件下飞机客舱内噪声频谱^[3]

Fig.1 Noise spectrum in aircraft cabin under experimental condition

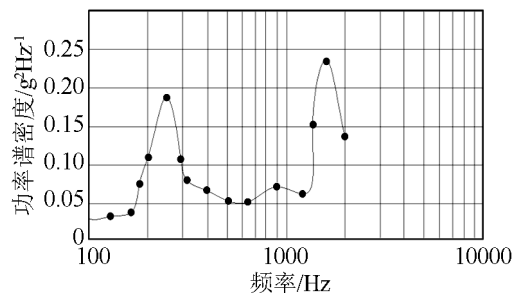


图 2 实验条件下导弹仪器舱加速度功率谱^[4]

Fig.2 Acceleration power spectrum of equipment capsule of missile under experimental condition

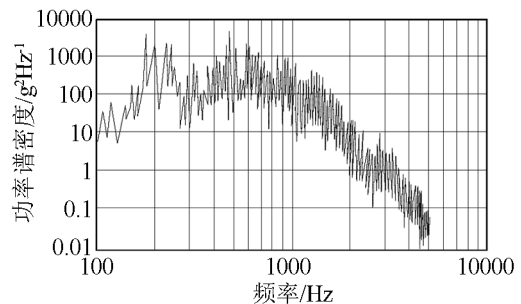


图 3 混响室内某卫星太阳翼加速度功率谱^[5]

Fig.3 Acceleration power spectrum of satellite wing in reverberation chamber

壳体振动均方根加速度可达 50g^[2],严重影响仪器的正常工作,因此预测模型输出变量多为均方(根)加速度。导弹的 SEA 模型在 200Hz 以上的频率范围内预测误差约为 3dB 左右^[4],卫星及太阳翼的 SEA 模型可预测的频率范围可以更低一些,预测精度也很好,有的模型可以做到均方根加速度预测值的误差介于 20%~50%之间^[4]。总之,结构越薄,模态密度越高,可预测频率的下限就越低,误差也越小。

火箭和导弹的研究难点是激励源十分复杂,在发射、箭体之间爆脱分离、运载机姿态瞬时变化时,系统会受到强大的瞬时冲击作用。对于高频部分的瞬时冲击可以采用基于冲击响应谱的方法来建立瞬态统计能量预测模型^[7,8],但是这些瞬时冲击的响应谱是很难预先知道的,一般来说只有通过实测来建立数据库。若使用液体燃料,还会涉及到复杂的液固耦合问题,这种耦合能够产生大振幅的纵向振

动(跷振)。

2.2 船舶和潜艇领域

大型船舶(包括舰艇)和潜艇的特点是构件尺度大(同波长相比)。船身基本由钢板和梁焊接而成,内部分若干个舱,可以简化为复合的单壳型声振耦合系统。潜艇艇身由双圆柱壳组成,壳体上分布有加强筋,双壳之间通过实肋板相连,可以简化为一个双壳型声振耦合系统,这一点与飞机类似,区别在于飞机的结构比更大,外部半无限空间的介质是空气。船舶和潜艇上的激励源分布广,频谱范围宽,多为发动机和其它机电设备。例如:柴油机频谱范围为 5~1000Hz,螺旋桨为 5~200Hz 之间,电动机为 20~200Hz,泵、风机为 5~300Hz,减速齿轮为 10 到几万 Hz;高速前进时,作用在壳体表面的湍流边界层脉动压力还会激起壳体振动,产生自噪声,强度随航速而增大。例如声纳这种薄壁结构的水动力分量自噪声强度约与航速的六次方成正比。图 4 是潜艇模型试验的外壳振动均方加速度级和内部声场声压频谱实测结果^[9]。

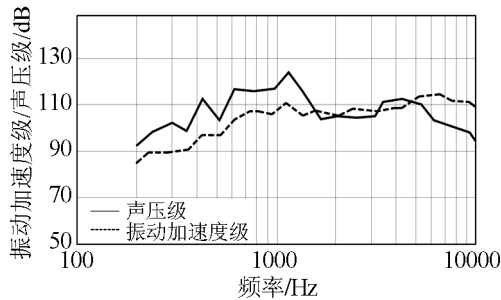


图 4 潜艇模型发动机外壳振动加速度级和舱内噪声频谱^[9]
Fig.4 Spectrum of acceleration and noise in cabin of submarine

SEA 模型预测可以针对整个船体,也可以是局部结构和空间,主要关心的问题是艇外和舱内的噪声辐射^[10],因此其输出变量多为声压级。根据现有文献所提供的 SEA 模型来看,船舶舱室的初步模型有划分成 8 个子系统的,潜艇可划分成 16~57 个子系统不等^[11,12],声纳腔模型多达 399 个子系统。模型的预测精度在 400~5000Hz 范围内可以控制在 3dB 之内,随着频率降低,精度也越来越差,在小于 400Hz 的范围有 6~10dB 左右的误差。

在船舶和潜艇中应用 SEA 理论的难点在于子系统间的连接方式、功率传递的路径非常复杂,给子系统的划分和 SEA 建模带来很大的困难;由于船舶体积巨大,要准确测量 SEA 参数有相当大的难度,大部分参数只能通过计算获取。这些因素不可避免地影响了模型的预测精度。有研究指出,对于船舶的研究用能量有限元法(EFEA)会比用统计能量分析法(SEA)更准确^[13]。这是因为能量分布和统

计能量分析参数在子系统内随空间的变化而有较大的变化,对其进行空间平均,势必带来较大的预测误差。

2.3 车辆领域

车辆的类型有很多,包括:汽车、拖拉机、各类工程车辆、机车、磁悬浮列车等。一般车辆驾驶室或乘客室部分包括车身、门窗、地板以及相连的动力和传动等构件,可以将其简化为单壳型声振耦合类型。其激励源主要是发动机及其传动设备、路面以及高速运行时的空气脉动噪声,这些均是广谱激励。当车速较高时,中高频的气动噪声成为车内主要的噪声源,图 5 对不同行使速度条件下驾驶室内噪声幅频特性做了对比^[14,15]。

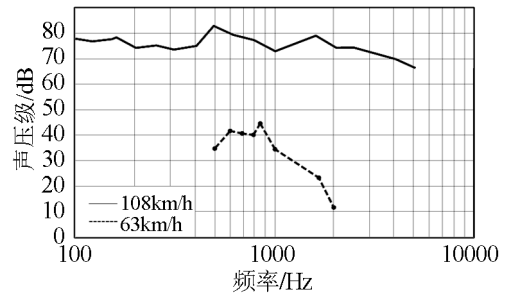


图 5 不同行使速度条件下驾驶室内噪声幅频特性对比^[14,15]
Fig.5 Cabin noise amplitude-frequency characteristic contrast under different speed conditions

此类 SEA 模型的输出变量一般是声压级,预测目的是为了控制车内噪声,提高舒适度、语言及声讯信号的清晰度,减少听觉损害。模型中的子系统根据研究需要的不同而变化,简单模型可包括 3~9 个子系统,复杂的模型多达 63 个子系统,模型预测的频率范围基本在 400Hz 以上,预测精度基本都可以达到 3dB^[16]。

2.3 动力机械领域

发电机、一些研磨搅拌机往往能够辐射出很强的噪声,例如电厂磨煤机 A 计权噪声级通常达到 120dB,因此 SEA 方法也可预测这类机械的噪声。以磨煤机为例,它是由外壳和内部的研磨机组成,基本上可以将其简化为单壳型声振耦合系统,辐射的噪声频谱范围主要在 300~5000Hz 之间^[17],见图 6。

一个简单的磨煤机 SEA 模型包括 4 个子系统,其噪声声压级预测误差平均为 3dB。由于子系统的形态和接触方式都比较复杂,大部分的 SEA 参数都需要实测。

2.4 家电领域

能够产生较大振动和噪声的家电一般有洗碗机(在国外比较普遍)、洗衣机和空调室外机等,从

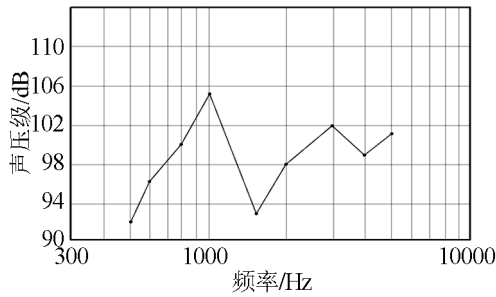


图 6 磨煤机噪声频谱^[17]
Fig.6 Noise spectrum of roller mill

文献上看, SEA 理论在洗衣机和空调室外机振动与噪声预测上的应用比较少,这是由其激励源和响应的频谱特征决定的:激励频谱基本上是个低频特征频率,机体的振动响应频谱表现为一系列离散的峰值,集中在 200~300Hz 以内,应用有限元模型能够对前几十阶振动模态进行比较准确的预测,采取相应措施抑制前几阶主要振型后就能达到振动和噪声治理目的。

但 SEA 方法在洗碗机的噪声声功率预测上却取得了良好的效果。洗碗机由封闭的内壳和近乎封闭的面板外壳组成,双壳之间通过框架连接,基本上可以简化为双壳型声振耦合系统。主要激励源是水流冲激洗碗机内壳和餐具,属于广谱激励,内壳振动加速度频谱主要为 20~1000Hz,见图 7。辐射的噪声频谱主要为 50~4000Hz,见图 8。某型洗碗机的 SEA 声功率预测模型包括 12 个子系统,其中有 3 个声子系统,预测误差在 250Hz 倍频程时为

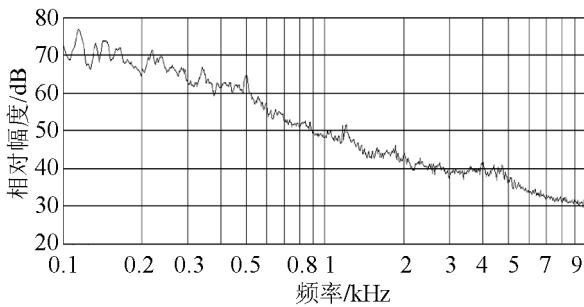


图 7 洗碗机内壳振动加速度频谱
Fig.7 Acceleration spectrum of internal shell of dishwasher

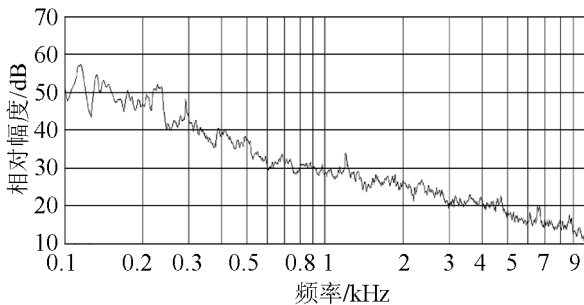


图 8 洗碗机噪声频谱
Fig.8 Noise spectrum of dishwasher

2~4dB,在 500Hz 倍频程时为 2dB 左右,基本上可满足产品降噪研发工程的需要。

2.5 建筑领域

在建筑领域内 SEA 方法应用得比较成熟的方面是预测隔墙(单层或双层)的隔声量。对于单墙隔声系统可将其划分为 3 个子系统,即房间 1、隔墙 2 和房间 3;对于双墙隔声系统,当频率大于双墙共振频率时,可将其划分为 5 个子系统,即房间 1、隔墙 2、空腔 3、隔墙 4、房间 5;当激发的声波频率小于双层墙的共振频率,可将其简化为单墙隔声问题。这类模型预测的频率范围一般是 125~4000Hz,预测误差基本上在 1~3dB 之内^[18]。对于形态简单、材料单一的平板隔墙,只要知道密度和弹性模量等基本物理参数,就可以用公式直接计算 SEA 参数。

3 统计能量分析法在实际应用中的问题

从上述的总结中我们了解到在应用得比较好的领域,其 SEA 模型预测精度为 3dB 左右,若从输出变量的绝对值来看,误差接近 100%,这说明 SEA 方法的预测精度还有待于进一步提高。但是在实际工程中这却不是简单的工作,即便是针对一个保守、弱耦合和不相关激励的系统,也存在着许多问题和困难,分析如下。

首先是子系统划分的问题。SEA 划分子系统主要依据振型的特点,然而在实际应用中依此原则划分子系统是有困难的。例如板件中同时存在面内伸展振动、剪切振动和弯曲振动,前两类子系统通常不受直接激励,振动能量很低,但它们传递振动的作用是不能忽略的。在实际工程应用中,划分子系统经常只考虑弯曲振型,忽略其他振型。这种简化对模型预测精度产生的影响值得深入研究。

其次是参数的测量和计算问题。很多统计能量分析参数不能直接通过计算求得,只能通过测量得到。当子系统的尺度大、形态复杂时,SEA 参数测量结果随激励和测量的位置有较大变化,误差比较大,比如耦合损耗因子、模态密度等。在实际工程中往往遇到较多的子系统相互连接在一起,无法分开的情形,这时内损耗因子和耦合损耗因子都不易测准。目前有许多研究致力于如何在复杂的系统中获得 SEA 参数,例如应用有限元法计算或灰色理论结合实验进行分析的方法。有限元法的缺点是当边界条件比较复杂或不清楚时,其高频段的计算结果是不可信的;灰色理论的缺点是其分析结果不是唯

一的。这两种计算方法要和实测结果进行对比和修正后才是可信的。

最后是关于单壳或双壳声振耦合系统中入射声波驱动结构子系统的方式和结构向自由或有界空间辐射声波的问题。两个问题合在一起就是声能传输方式的问题,表现为如何求不同传输路径的耦合损耗因子。一般来说声波激励结构有共振和非共振两种方式^[19]。共振激励是指声波驱动相同频率的结构弯曲模态。当频率以及迹迹波长与被驱动模态的频率和波长相同时,这种方式产生吻合效应,最有利于声波的透射,形成声能的共振传输。非共振激励的方式有两种,一种方式是把结构作为质量块,在声压差的作用下象活塞一样做振动,产生非共振传输,声能的透射遵从质量定律。当入射声波频率小于结构的一阶弯曲波振动频率时,这种方式是声能主要的传输途径;另一方式是声音在斜入射结构时产生追迹效应,激励频率更高的弯曲波模态,形成声能的透射,产生非共振传输。当入射声波的频率小于结构的临界频率时,这种非共振传输方式是不可忽略的。

由于在实测中把不同激励方式的振动能量和不同传输方式的声能分离是很困难的,因此常用公式来计算声振耦合损耗因子。大部分公式所引用的辐射比是基于无限板在半无限空间辐射的条件下推导出来的,不适用于有界声场,因为辐射阻不一样。许多工程应用没有注意到这个问题,导致 SEA 模型在高频段预测声场的误差反而增大。

文献[20]认为弹性板向声腔辐射时,辐射阻近似为半自由空间的 2 倍。如果要精确地求出有界空间内的声辐射阻,应当对边界进行积分,求所有边界反射对辐射面的互阻抗。

4 结 论

通过对 SEA 理论在大多数领域内应用成果的总结,可以得到如下的结论:

(1) 含声子系统的单壳和双壳声振耦合系统是两种基本的 SEA 模型,这类系统的特点是内外的声能交换须通过声振耦合来实现,当激发的声波频率低于双壳的共振频率时,双壳系统转化为单壳系统。

(2) 在保守、弱耦合和不相关激励条件下,若要提高单壳和双壳声振耦合系统 SEA 声振预测模型的精度,还有如下的研究工作需要继续深入:首先是子系统的划分。这方面要深入研究弯曲波之外的振型系统对整个系统能量储存、传输和消耗的影响程度;其次是 SEA 参数的测量和计算,特别是耦

合损耗因子。比较有价值的工作是针对各领域典型的系统连接方式进行系列测试,建立数据库,在此基础上建立可靠的理论计算模型;最后是有界空间内结构辐射比以及声波共振与非共振两种传输方式耦合损耗因子的研究。

参 考 文 献

- [1] 王彦琴, 盛美萍, 孙进才. 统计能量分析预测飞机壁板隔声量及舱室内声场分布[J]. 声学技术, 2003, 22(4): 219-222.
WANG Yanqin, SHENG Meiping, SUN Jincai. Prediction of transmission loss through aircraft sidewall and cabin noise using statistical energy analysis[J]. Technical Acoustics, 2003, 22(4): 219-222.
- [2] 谢久林, 杨松, 张俊刚, 等. 航天器声振动力学环境响应分析[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(2): 83-89.
XIE Jiulin, YANG Song, ZHANG Jungang. The response prediction of the spacecraft under acoustic vibration environment [J]. Space Environment Engineering, 2006, 23(2): 83-89.
- [3] 胡莹, 陈克安, 潘凯. 基于统计能量分析的飞机舱室降噪研究[J]. 噪声与振动控制, 2007, (2): 65-68.
HU Yin, CHEN Ke'an, PAN Kai. Optimization design about plane cabin noise based on statistical energy analysis[J]. Noise and Vibration Control, 2007, (2): 65-68.
- [4] 刘小平. 用统计能量法预示导弹仪器舱的动力学环境[J]. 导弹与航天运载技术, 2000, (246): 52-56.
LIU Xiaoping. Predicting the dynamic environment of missile instrument bay with the statistical energy analysis method[J]. Missile and Space Vehicles, 2000, (246): 52-56.
- [5] 韩增尧, 曲广吉. 统计能量分析在太阳翼噪声分析上的应用[J]. 中国空间科学技术, 2001, (1): 52-56.
HAN Zengyao, QU Guangji. Application of noise analysis on solar array by statistical energy analysis[J]. Chinese Space Science and Technology, 2001, (1): 52-56.
- [6] 聂旭涛, 熊飞峤. 运用统计能量分析法预示空空导弹舱内动力学环境[J]. 振动与冲击, 2007, 26(4): 140-143.
NIE Xutao, XIONG Feiqiao. Predicting dynamic environment of air to air missile module with statistical energy analysis method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(4): 140-143.
- [7] Iadevaia M, Van Hal B, Riobbo J L. Using statistical energy analysis for shock pulse predictions[A]. Proceedings of ISMA2002[C]. 2002, (5): 2337-2341.
- [8] Lai M L. Statistical energy analysis for the time-integrated transient response of vibrating system[J]. Journal of Sound and Vibration, 1990, 112(2): 206-213.
- [9] 童宗鹏, 王国治, 张志谊, 等. 水下航行器声振特性的统计能量法研究[J]. 噪声与振动控制, 2001, (1): 29-32.
TONG Zongpeng, WANG Guozhi, ZHAN Zhiyi, et al. Research on vibration and acoustic radiation of the submarine structure with sea method[J]. Noise and Vibration Control, 2001, (1): 29-32.
- [10] Hynna P, Klinge P, Vuoksinen. Prediction of structure-borne sound transmission in large welded ship structures using statistical energy analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 180(4): 583-607.
- [11] 刘小勇, 盛美萍, 行晓亮, 等. 双层圆柱壳噪声预报及统计能量参数灵敏度分析[J]. 振动与冲击, 2007, 26(7): 50-53.
LIU Xiaoyong, SHENG Meiping, XING Xiaoliang, et al. Prediction of noise radiation from a ring-stiffened cylindrical double-shell and sensitivity analysis of sea parameters[J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(7): 50-53.
- [12] 缪旭弘, 陶景桥, 姚熊亮, 等. 基于灰色理论的水下双层壳体振动

- 与声辐射统计能量分析[J]. 船舶力学, 2006, 10(2): 146-152.
- MIAO Xuhong, TAO Jingqiao, YAO Xiongliang, et al. Research of applying sea in vibration and sound radiation of submerged double cylindrical shell[J]. Journal of Ship Mechanics, 2006, 10(2): 146-152.
- [13] Vlahopoulos N, Garza-Rios L O, Mollo C. Numerical implementation, validation and marine applications of an energy finite element formulation[J]. J of Ship Research, 1999, 43(3): 143-156.
- [14] 宫镇, 夏恒, 曾发林, 等. 高速车辆内部气流噪声的统计能量分析[J]. 农业机械学报, 2003, 34(2): 7-10.
- GONG Zhen, XIA Heng, ZEN Falin, et al. Statistical energy analysis of interior aero dynamic noise of high-speed automobile[J]. Journal of Agriculture Mechanism, 2003, 34(2): 7-10.
- [15] 于学华. 基于 SEA 法的汽车道路噪声研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007, 35(11): 46-49.
- YU Xuehua. Investigation into vehicle road noise via statistical energy analysis[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2007, 35(11): 46-49.
- [16] 靳晓雄, 叶伍平, 丁玉兰. 基于统计能量分析法的轿车内噪声优化与控制[J]. 同济大学学报, 2002, 30(7): 862-867.
- JIN Xiaoxiong, YE Wuping, DING Yulan. Car interior noise simulation using statistical energy analysis method[J]. Journal of Tongji University, 2002, 30(7): 862-867.
- [17] 周净宜, 周少雄, 谢方. 统计能量法在电厂球磨机噪声预测中的应用[J]. 华中理工大学学报, 1998, 26(Sup.1): 41-43.
- ZHOU Jingyi, ZHOU Shaoxiong, XIE Fang. Noise prediction of roller mill in power plant by statistical energy analysis method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 1998, 26(Sup.1): 41-43.
- [18] 黄险峰. 双层墙隔声量 SEA 预测. 四川建筑科学研究[J]. 2006, 32(1): 164-166.
- HUANG Xianfeng. Prediction of sound insulation to double-panel structure[J]. Sichuan Building Science, 2006, 32(1): 164-166.
- [19] 姚德源, 王其政. 统计能量分析原理及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.
- YAO Deyuan, WANG Qizhen. Foundation and application of statistical energy analysis[M]. Beijing: The Science and Technology University of Beijing Press, 1997.
- [20] Price A J. Sound transmission through double panels using statistical energy analysis[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1970, 43(7):